

## Resumen

El material objeto de estudio es un composite formado por acero y cerámico. Los dos cerámicos estudiados en el material compuesto han sido zircona y alúmina, ambos presentaban diferentes tamaños: 10, 20 o 30 ppi. El objetivo del presente proyecto era determinar la mejor resistencia al desgaste de todos los composites estudiados.

Utilizando diferentes tipos de ensayos, ya sean de desgaste con disco de diamante, de desgaste con discos de carburo de silicio o con análisis de imagen se consiguió obtener resultados pero dada la novedosa naturaleza del material y la poca bibliografía encontrada, de momento no ha sido posible alcanzar el propósito descrito; si bien se ha mejorado el tratamiento y el dispositivo para futuros estudiantes.

De otra parte se ha caracterizado mecánicamente el material mediante ensayos de compresión. En efecto mismo si no fue posible tener los resultados esperados con los ensayos de desgaste, se ha mostrado la buena resistencia y el posible interés del material.

Así pues, el presente proyecto final de carrera se centra en una precisa descripción de la caracterización mecánica empleada y sienta las bases para futuros estudios sobre el tema.





# Indice

<b>RESUMEN</b>	<b>1</b>
<b>INDICE</b>	<b>3</b>
<b>1 GLOSARIO</b>	<b>5</b>
<b>2 INTRODUCCIÓN</b>	<b>7</b>
<b>3 MATERIAL Y MÉTODO EXPERIMENTAL</b>	<b>8</b>
3.1 Material <sup>[1]</sup>	8
3.2 Ensayos de desgaste	8
3.2.1 Mecanizado de probetas	8
3.2.2 Método experimental de desgaste <sup>[3][4]</sup>	10
3.3 Ensayos de compresión <sup>[5]</sup>	12
3.3.1 Mecanizado de probetas	13
3.3.2 Método experimental de compresión <sup>[6]</sup>	13
<b>4 RESULTADOS Y DISCUSIONES</b>	<b>15</b>
4.1 Desgaste con disco de diamante	15
4.1.1 Resultados	15
4.1.2 Discusiones <sup>[7][8]</sup>	22
4.2 Análisis de imagen	24
4.3 Desgaste con discos de carburo de silicio	27
4.3.1 Resultados	27
4.3.2 Discusiones	28
4.4 Soluciones para el desgaste	30
4.5 Ensayos de compresión	31
4.5.1 Fundamento teórico	31
4.5.2 Resultados	33
4.5.3 Discusiones	41
<b>5 CONCLUSIONES</b>	<b>42</b>



<b>6 BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>43</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b>	<b>44</b>
<b>PRESUPUESTO</b>	<b>45</b>
<b>IMPACTO SOBRE EL MEDIO AMBIENTE</b>	<b>47</b>



# 1 Glosario

$ZrO_2$  → Óxido de zirconio o Zircona

$Al_2O_3$  → Óxido de aluminio o Alúmina

ppi → Poros por pulgadas (Pores per inch)

Rpm → Revoluciones por minuto

Lbs → Libras (Pounds)

N → Newton

kN → KiloNewtons

F → Fuerza aplicada durante la compresión

v → Velocidad de compresión

mm → Milímetros

mm/s → Milímetros por segundo

% → Porcentaje

Med X min → Media de X minutos

MPa → MegaPascuales

$\varepsilon_{ef}$  → Épsilon efectivo, deformación efectiva

$\varepsilon_{med}$  → Épsilon medido, deformación medida

$\varepsilon_C$  → Épsilon C, deformación de la máquina de compresión

$\sigma$  → Tensión





## 2 Introducción

El proyecto final de carrera se articula en torno a una empresa industrial, cuyo nombre no se puede divulgar, que utiliza excavadoras. Las excavadoras están compuestas de palas de acero y se quiere encontrar un material para los dientes de esas palas, el cual sea más resistente en el tiempo. Es bien conocido que el material más resistente y más duro que el acero es la cerámica por eso se ha pensado en combinar ambos en un mismo material. La cerámica en sí misma es imposible de utilizar como único material en las palas de las excavadoras porque es un material muy duro y a la vez muy frágil.

Se estudiaron diversos composites compuestos de diferentes materiales y diferentes tamaños:

- Acero puro
- Acero y Zircona ( $\text{ZrO}_2$ ) de 10 y 30 ppi
- Acero y Alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) de 20 y 30 ppi

El objetivo principal de este proyecto de fin de carrera era encontrar el mejor material para resistir a un desgaste abrasivo.

Después de algunos ensayos de desgaste los resultados encontrados no han sido todo lo bueno que cabría haber esperado. Debido a las propiedades inherentes a cada material era de esperar que el composite acero/cerámico fuera más resistente. Sin embargo, ocurrió lo contrario, el acero puro resistía mejor al desgaste que cualquiera de los composites acero/cerámico estudiados.

No obstante se decidió cambiar el protocolo experimental utilizado hasta el momento, ya que se alejaba del desgaste real sufrido por las palas de la excavadora en su funcionamiento cotidiano. No se ha podido realizar todo lo que se pretendía y además no se ha llegado a alcanzar unos correctos resultados.

También se han llevado a cabo ensayos de compresión para verificar las propiedades del material y ver su resistencia contra este tipo de esfuerzo.



## 3 Material y método experimental

### 3.1 Material <sup>[1]</sup>

El material estudiado es un composite formado por acero y cerámica. La matriz es de material cerámico reforzado con acero. El composite obtenido es bastante homogéneo, e interpenetrado, La matriz, que es una espuma de cerámico, podría representarse como las cadenas del ácido desoxirribonucleico, ADN.

El acero estudiado, ya sea en el composite o en el acero puro, es de bajo carbono con un porcentaje en peso del 0.10%. Se le ha realizado un tratamiento térmico de temple y revenido obteniéndose así un acero con microestructura de martensita revenida.

Los aceros con esta microestructura son los más duros y mecánicamente más resistentes. Poseen una dureza Vickers de 5 GPa con un módulo de Young de 200 GPa.

Los cerámicos usados son óxido de zirconio,  $ZrO_2$ , y óxido de aluminio,  $Al_2O_3$ , más conocidos como zircona y alúmina. Ambos materiales son porosos y microfisurados, por eso presentan un módulo de Young de aproximadamente 80 GPa. Otra característica es la elevada dureza que poseen, entre 8 y 10 GPa<sup>[2]</sup>.

### 3.2 Ensayos de desgaste

#### 3.2.1 Mecanizado de probetas

Las probetas para los ensayos de desgaste, ya sean las de acero o las de composite acero/cerámico, tienen que estar mecanizadas en cubos de dimensiones de 10x10x10mm.





### 3.2.1.1 Acero

La mecanización de las probetas de acero fue la parte más fácil del proyecto. Como el acero es un material conductor se mecanizó por electroerosión de hilo. En efecto este sistema puede cortar todo tipo de metales independientemente de su dureza sin producir ninguna alteración del material. El corte por hilo de las probetas se subcontrató y lo realizó la empresa MIMATEC SL., gracias a la colaboración de Aitor Requena y a la fundación CIM, además de la cooperación de Juan Vicente Rodríguez Redondo.

### 3.2.1.2 Composite

Uno de los grandes retos del proyecto fue la mecanización de las probetas de material compuesto acero/cerámico. Hoy en día es bien conocido como cortar el acero o el cerámico por separado, pero los dos mezclados de manera casi homogénea es diferente.

En los inicios del presente proyecto se intentó cortar el composite con un disco de diamante montado en una tronzadora metalográfica. Este dispositivo funcionó muy bien para cortar el cerámico y no tan bien para el acero. Como el acero es más blando, cuando el disco pasaba de una parte cerámica a una parte de acero, se forzaba al sistema con el consecuente calentamiento y el corte no era bueno.

Comprobada la dificultad en el mecanizado del composite, se preguntó a la empresa MIMATEC SL. si disponía de alguna solución. Probaron el corte por electroerosión, pero siempre se rompía el hilo al encontrar la parte cerámica. Finalmente, se consiguió cortar los grandes trozos del material en otros más pequeños y así con una rectificadora hidráulica de superficies planas se alcanzó a tener probetas de dimensiones adecuadas. Nótese la dificultad y el retraso en cuanto a tiempos establecidos que originó encontrar el procedimiento de corte apropiado.



Figura 3.2.1. Rectificadora hidráulica de superficies planas.



### 3.2.2 Método experimental de desgaste <sup>[3][4]</sup>

#### 3.2.2.1 Disco de diamante

El principio de un ensayo de desgaste abrasivo es desgastar un material aplicando una fuerza dada durante un tiempo definido sobre un disco o una parte abrasiva. Para hacer estos ensayos se utilizó una pulidora automática, tal y como observa en la figura 3.2.2.



Figura 3.2.2. Montaje de desgaste con disco de diamante.

La etiqueta 1 de la figura 3.2.1. es un plato fijado a la parte superior con un panel de control donde se indica el tiempo y la fuerza aplicada. Sin embargo, la fijación tiene un juego que permite que la fuerza sea repartida en cualquier punto del plato y este punto es importante porque si un material se desgasta más que el otro, cada probeta tendrá la misma fuerza aplicada sobre ella.

La etiqueta 2 de la figura 3.2.1. es el disco de diamante fijado en la parte inferior con un panel de control que permite definir la velocidad de rotación.

El protocolo experimental realizado se describe a continuación.



El primer punto consistió en adherir dos probetas en el plato, situándolas una enfrente de la otra y lo más cerca posible del borde, tal y como se representa en la figura 3.2.2.

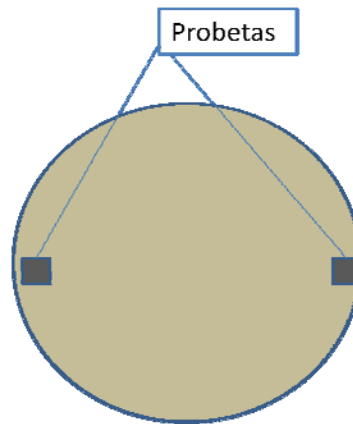


Figura 3.2.3. Esquema del plato.

A continuación, se fijó este plato en el equipo y se definió la velocidad y la fuerza aplicada. Al principio se trabajó con una velocidad de 150 rpm y una fuerza de 25 lbs (que corresponda aproximativamente a 111 N), pero después de algunos ensayos poco exitosos se cambió a una velocidad y una fuerza mínima y éstas fueron de 20 rpm y 5 lbs (22 N).

Los tiempos de desgaste empleados fueron de 5 ó 8 minutos.

Para determinar el desgaste se disponía de un dispositivo que contaba con un reloj comparador numérico. Éste medía el grosor de material antes y después del desgaste en cuatro puntos para cada probeta, así se determinaba el volumen eliminado durante un tiempo definido.

La figura 3.2.4. representa el plato con las probetas adheridas, así como el reloj comparador y una pinza que se utilizaba para realizar fotografías de la superficie de las probetas sin necesidad de mover la cámara fotográfica.





Figura 3.2.4. Montaje de medidas del desgaste

### 3.2.2.2 Discos de carburo de silicio

El método experimental para los ensayos con discos de carburo de silicio era el mismo que con discos de diamante, la única diferencia consistía en el material del disco, además de sutiles diferencias en cuanto a la colocación. Los parámetros de fuerza aplicada, velocidad de rotación y tiempos de desgaste fueron los mismos que los utilizados en los ensayos de desgaste con disco de diamante.

## 3.3 Ensayos de compresión<sup>[5]</sup>

Los ensayos de compresión realizados tienen por objeto corroborar los valores de las propiedades mecánicas. Además si se tiene en cuenta cómo trabajan las palas de las excavadoras durante su vida en servicio, los ensayos de compresión proporcionan una valiosa información para tal fin.

Durante su vida en servicio, una pala de excavadora arranca piedras de una pared por ejemplo, y no sólo se desgasta por fricción contra la pared y la piedra, sino que además también hay piedras que caen en la pala o sobre los dientes causando otro tipo de daño. Por lo tanto, sería interesante observar el comportamiento de este material frente a este tipo de acciones.



### 3.3.1 Mecanizado de probetas

Los ensayos de compresión se realizaron sobre probetas paralelepípedas cuyas dimensiones fueron de 10x10x15 mm.

#### 3.3.1.1 Acero

La mecanización de las probetas de acero para realizar los ensayos de compresión se realizó por electroerosión. La empresa MIMATEC SL. se encargó de este cometido, como ya había mecanizado con anterioridad las probetas para los ensayos de desgaste.

#### 3.3.1.2 Composite

Las probetas de material compuesto acero/cerámico fueron difíciles de mecanizar. Al igual que en la mecanización de las probetas para ensayos de desgaste se utilizó un disco de diamante y se cortó con la tronzadora metalográfica. Con este tipo de corte se obtuvieron grandes fragmentos de material que, posteriormente, fueron cortados en piezas de dimensiones menores. Para tal fin se utilizó una cortadora con disco de diamante de delgado espesor, lo cual no facilitó el corte ya que el disco de diamante se desviaba y las dimensiones obtenidas no fueron las adecuadas. Por este motivo, las probetas fueron rectificadas en el centro CIM, alcanzándose unas dimensiones de 9x9x14 mm. Para reproducir el mismo tipo de ensayo, las probetas de acero también fueron rectificadas a estas mismas dimensiones.

### 3.3.2 Método experimental de compresión<sup>[6]</sup>

Los ensayos de compresión se realizaron con los equipos del departamento de resistencia de los materiales y estructuras de ingeniería de la Universidad Politécnica de Catalunya.

El punto más importante y destacable del protocolo experimental de los ensayos de compresión fue la realización de los mismos el mismo día porque se determinó el componente de fluencia de la máquina de ensayos.



Primero se evaluó la forma de las áreas transversales a fin de establecer pequeñas diferencias entre los lados de las probetas, los cuales debían ser de 10mm cada uno y que finalmente fueron de 9mm.

De la misma manera, se evaluó la longitud de las probetas a fin de establecer pequeñas variaciones sobre la longitud ideal que debería haber sido de 15mm y que, finalmente, fueron de 9mm.

A continuación, se introdujeron las variables en el software de la máquina de ensayos, cuya célula de carga es superior a los 100 kN. Los parámetros fueron una deformación máxima del 20% y una velocidad de 0.025 mm/s.

Se obtuvieron los diagramas de carga desplazamiento del pistón para cada probeta, primero con las de acero puro y después con las de material compuesto.

Era necesario prestar especial atención al posible desarrollo de picos y altibajos en las curvas de los materiales cargados con cerámico tanto en el rango elástico como en el plástico. Así como a la generación de pequeños ruidos, como crujidos que podían indicar microfracturas en el cerámico.

El procedimiento experimental descrito requería encontrar un material más duro que el acero y el composite para colocar en ambas bases de las probetas de manera que no hubiera un contacto directo entre las probetas de ensayo y las mordazas del equipo.

Cabe destacar la pérdida de tiempo que supuso la búsqueda de este material. En un primer momento se tenían placas de alúmina con un orificio en el centro, el cual resultó un concentrador de tensiones, que llevó a la rotura de la placa de alúmina y a descartar una de las cuatro probetas de acero puro.



## 4 Resultados y discusiones

### 4.1 Desgaste con disco de diamante

#### 4.1.1 Resultados

Los primeros ensayos realizados fueron sobre una probeta de acero y otra de composite con zircona de 10 ppi adheridas en el mismo plato. En la figura 4.1.1. se observan los desgastes

En la figura 4.1.1 se observan los desgastes medios durante diferentes tiempos, 3, 5 y 8 minutos. El color rojo del diagrama corresponde al desgaste de la zircona y el azul al del acero y se seguirá este mismo criterio en toda la discusión.

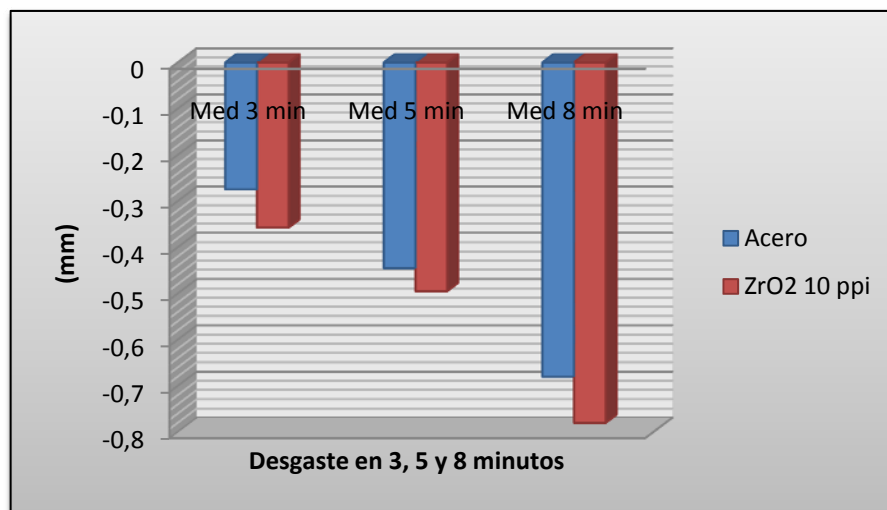


Figura 4.1.1. Desgaste del acero y de la zircona 10 ppi adheridos en el mismo plato.

Nótese que la zircona se desgasta un poco más que el acero puro independientemente del tiempo de desgaste. Considerándose que la diferencia de desgaste no crece con el tiempo.



La figura 4.1.2. representa el desgaste total acumulado de todos los pequeños desgastes vistos en la figura 4.1.1. Como era de esperar el composite se desgasta más que el acero. En 36 minutos el acero se ha desgastado un 31%, mientras que el composite se ha desgastado un 36.5%.

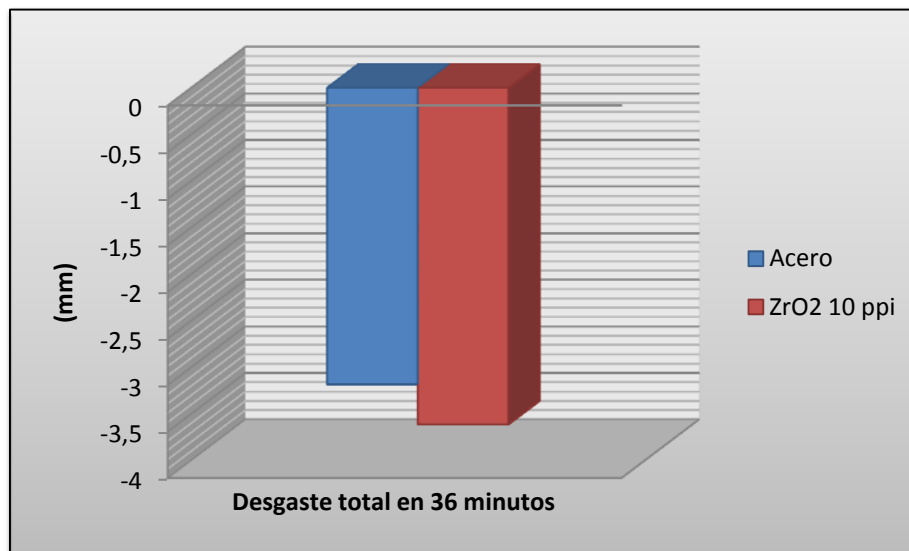


Figura 4.1.2 Desgaste total del acero y de la zircona adheridos en el mismo plato.

Se han realizado diferentes ensayos con el composite de zircona 10 ppi, obteniéndose siempre los mismos resultados. Por esta razón se decidió realizar primero un ensayo con dos probetas de acero colocadas en el mismo plato y después el mismo tipo de ensayo con dos probetas de composite cargado con un tamaño más grande, con 30 ppi.





En la figura 4.1.3., se observa el resultado de desgaste medio durante 5 minutos para el acero puro y el material cargado.

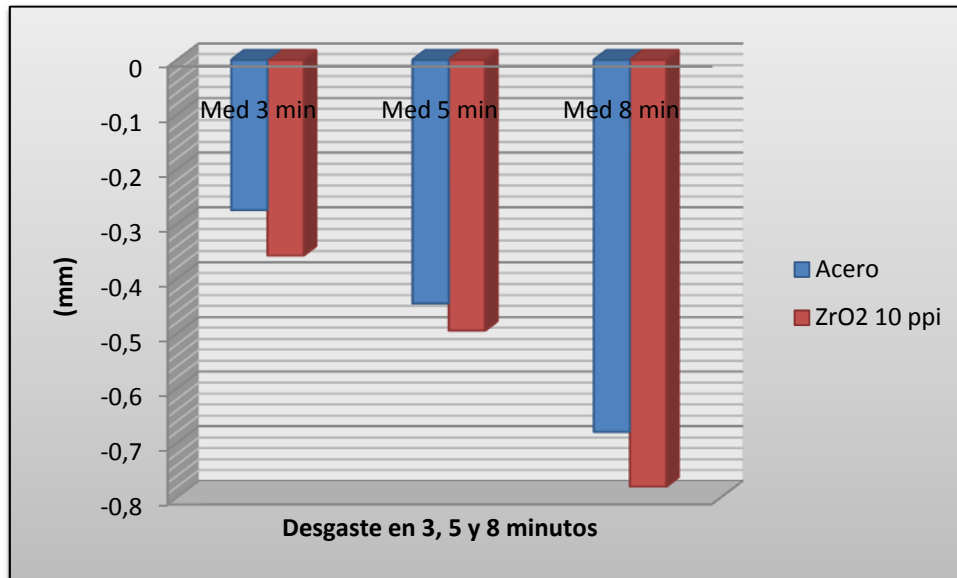


Figura 4.1.3. Desgaste durante 5min del acero y zircona 30ppi en platos diferentes.

La figura 4.1.4. muestra los valores de desgaste medio obtenidos en 8 minutos.

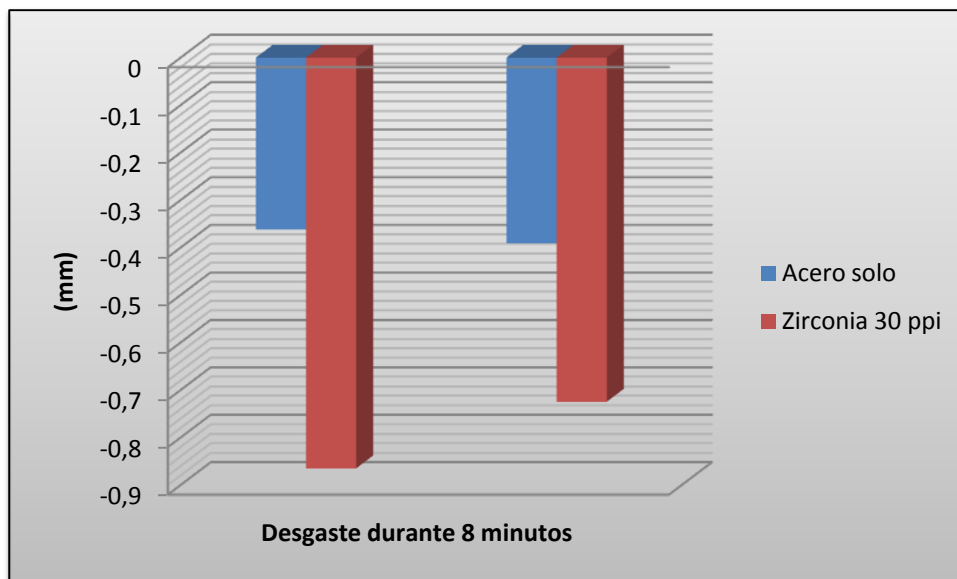


Figura 4.1.4. Desgaste en 8min del acero y zircona 30ppi en platos diferentes.



Apréciase que el material cargado se desgasta entre dos y tres veces más rápidamente que el acero puro. Como esta experiencia no fue concluyente se decidió retomar los ensayos con una probeta de acero y otra de composite adheridas en el mismo plato.

La figura 4.1.5. representa el desgaste medio de las dos probetas de acero y del composite durante 5 y 8 minutos. Obsérvese la diferencia de desgaste a favor del composite. El acero se desgasta un poco más rápidamente que el material cargado, aunque esta diferencia no es significativa.

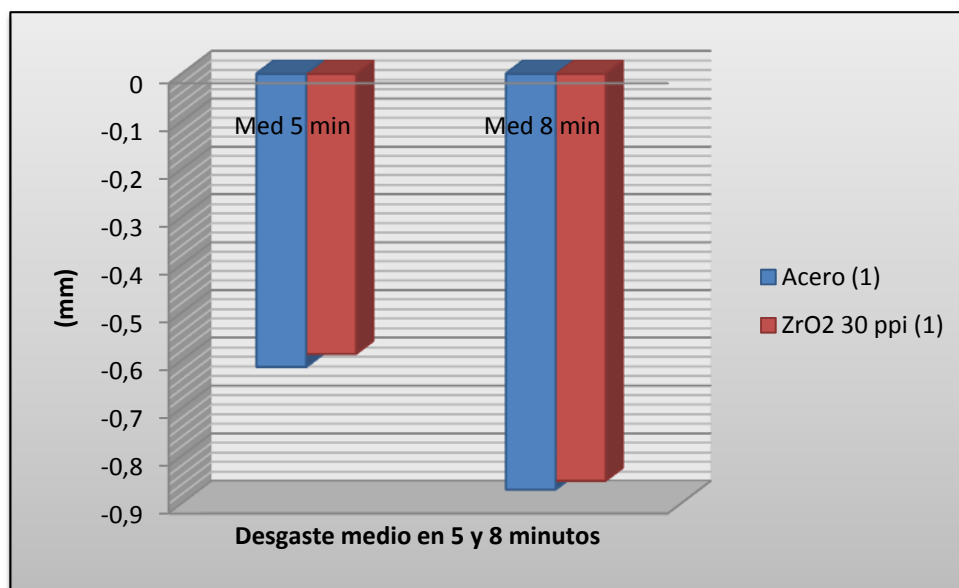


Figura 4.1.5. Desgaste parcial del acero y de la zircona 30ppi adheridos en el mismo plato.



La figura 4.1.6. representa la suma de los desgastes de la figura 4.1.5. Se puede observar que en 34 minutos el acero se ha desgastado un 38%, mientras que el composite sólo se ha desgastado un 37%.

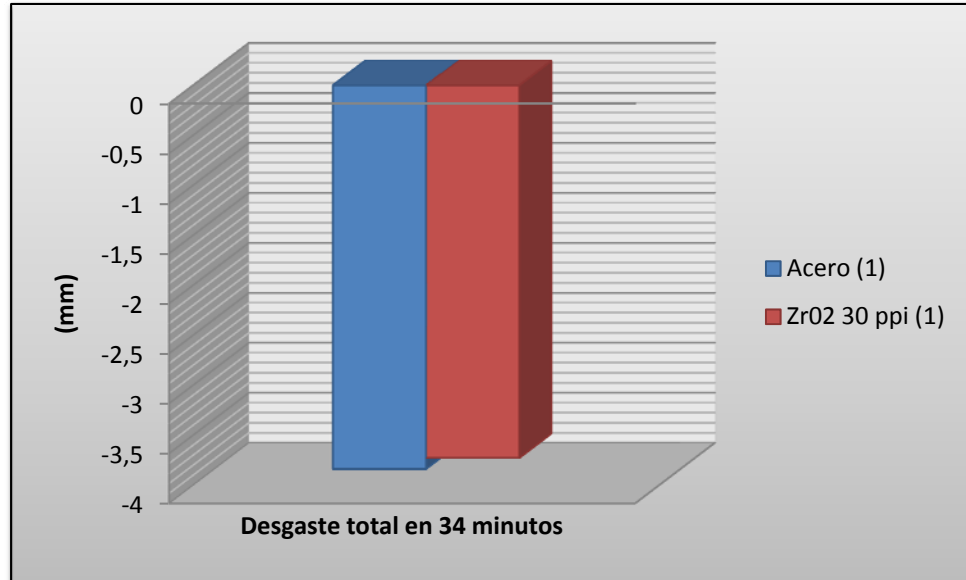


Figura 4.1.6. Desgaste total de lacero y de la zircona 30ppi adheridos en el mismo plato.

Como la diferencia de desgaste entre los dos materiales no es significativa, se procedió a realizar nuevos ensayos con exactamente las mismas condiciones, aunque sólo se disponían de dos probetas de cada material.



Los ensayos mostrados en la figura 4.1.7. reproducen las mismas condiciones que los de la figura 4.1.5., pero ahora se hace más evidente la diferencia de comportamiento entre los dos materiales. El composite se desgasta mucho más rápidamente que el acero.

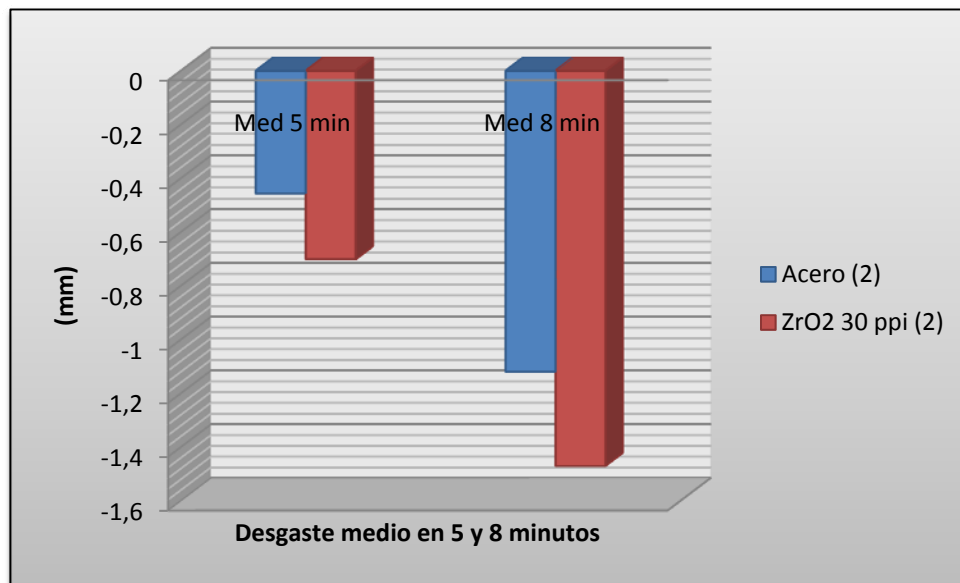


Figura 4.1.7. Desgaste parcial del acero y de la zircona 30ppi adheridos en el mismo plato.

La figura 4.1.8. muestra la suma total de los desgastes producidos en 34 minutos, observándose que el acero se ha desgastado un 42% y el composite un 57%.

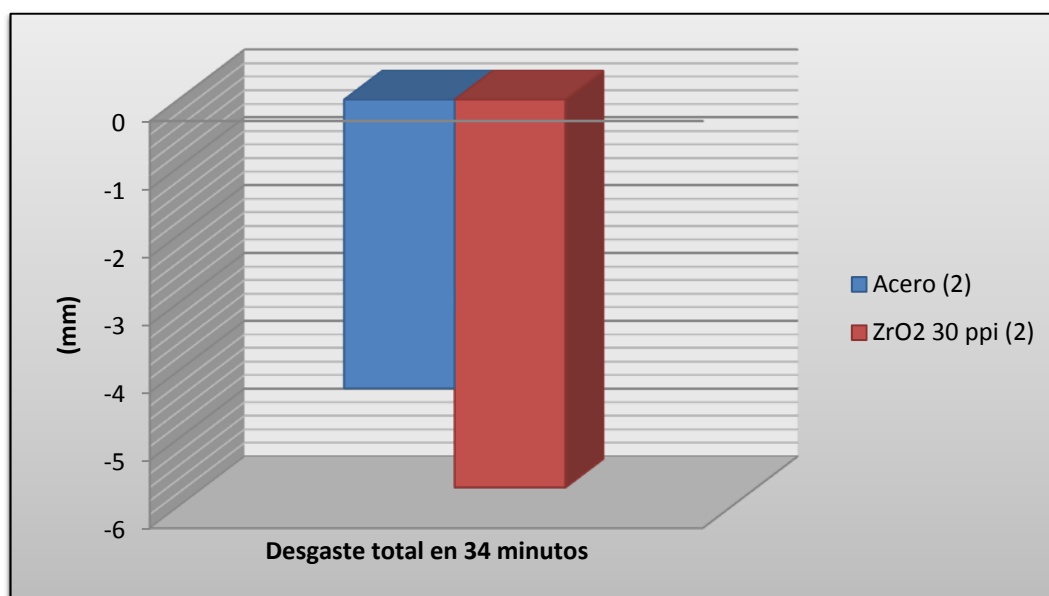


Figura 4.1.8. Desgaste total del acero y de la zircona 30 ppi adheridos en el mismo plato.



Al obtenerse estos resultados se probó con un composite diferente, substituyendo la zircona por el de alúmina pero con el mismo tamaño, de 30 ppi.

La figura 4.1.9. representa el desgaste del composite de alúmina comparado con el del acero. Adviértase la notable diferencia entre los dos materiales, al igual que sucedía con el composite de zircona, el de alúmina se desgasta mucho comparado al acero.

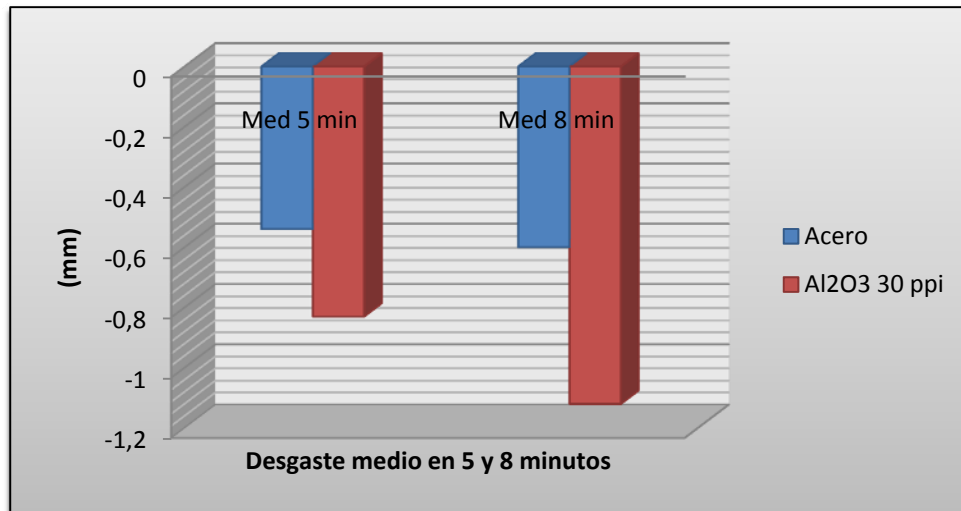


Figura 4.1.9. Desgaste parcial del acero y de la alúmina 30 ppi pegados en el mismo plato.

La figura 4.1.10. muestra el desgaste total en 34 minutos. La alúmina se desgasta todavía más que el acero con una significativa diferencia del 10%.

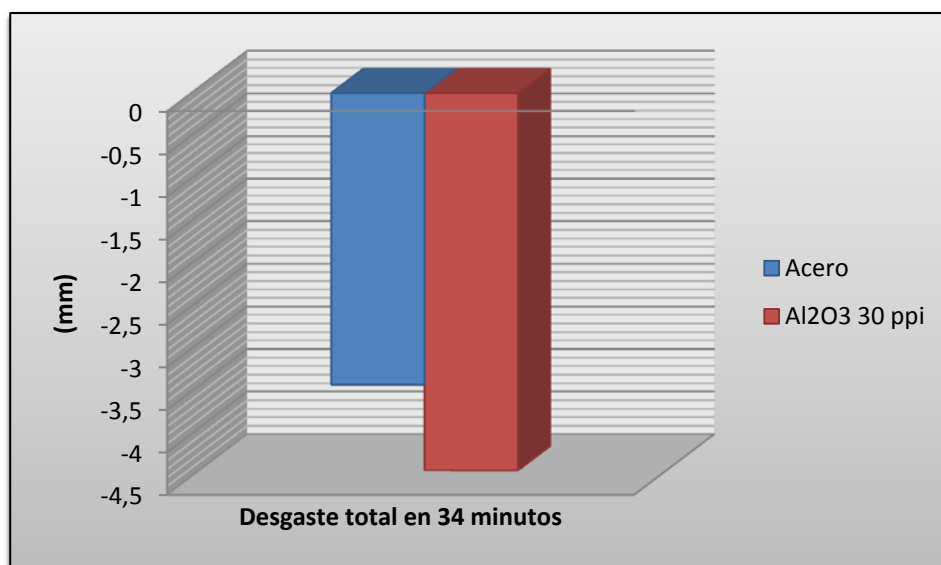


Figura 4.1.10. Desgaste total del acero y de la alúmina 30ppi adheridos sobre el mismo plato.



#### 4.1.2 Discusiones<sup>[7][8]</sup>

Durante todos estos ensayos de desgaste con disco de diamante se han obtenido resultados que parecían contradecir lo reportado en la bibliografía<sup>[9][10]</sup>.

En efecto, la figura 4.1.2. muestra que el composite que tiene zircona de 10 ppi se desgasta algo más rápidamente que el acero puro. Después de este inesperado resultado, se puede concluir que el material cargado no tiene suficiente cantidad de cerámico para que se aprecie diferencia. Únicamente se ha contrastado un 5% de diferencia entre los dos desgastes realizados en un tiempo de 36 minutos, además no crecía esta diferencia con el tiempo de desgaste.

Dada la incongruencia de los resultados obtenidos, se decidió realizar los mismos ensayos de desgaste con un material cuyo tamaño de material cerámico fuera superior, es decir, probar con un cerámico más denso. Por este motivo se escogió zircona con un tamaño de 30 ppi que era el tamaño más grande disponible.

El hecho de desgastar dos tipos de materiales, acero y composite, adheridos sobre el mismo plato podría tener como consecuencia que las partículas de cerámico del composite, eliminadas durante el desgaste se acumularan en el plato produciendo un desgaste adicional sobre el acero. De esta manera, se podría justificar la similitud de resultados obtenidos para los dos tipos de materiales, pero los valores mostrados en las figuras 4.1.3. y 4.1.4. están en desacuerdo con esta hipótesis.

El material cargado se desgasta de dos a tres veces más que el acero, independientemente del tamaño del cerámico. El hecho de que el material al sufrir desgaste se quedase en el plato no es incorrecto, aunque sí es cierto que con dos probetas de material cargado hay el doble de partículas de cerámico que desgatan al acero del composite, ya que el acero puro es un material más blando que la cerámica. Por otra parte, pudiera suceder que las partículas abrasivas de diamante no fueran suficientes para desgastar bien el acero.

Como se ha demostrado que colocar dos materiales del mismo tipo adheridos al mismo plato no era correcto, se volvió a situar una probeta de cada material.

Los resultados de la figura 4.1.6. muestran que el material cargado es más resistente que el acero puro. Sin embargo, los valores obtenidos no permiten concluir nada al respecto ya



que son similares, sólo hay un 1% de diferencia entre los dos materiales después de 34 minutos. Por lo tanto, ambos materiales se han desgastado casi a la misma velocidad.

Observando los resultados de la figura 4.1.8., la diferencia del 1% existente en los primeros ensayos ha desaparecido para dar paso a una diferencia del 15% a favor del acero. Estos valores muestran, al igual que los obtenidos en la figura 4.1.2., que el material cargado se desgasta mucho más rápidamente que el acero puro.

Con el fin de ver si la naturaleza de la cerámica influye mucho en los resultados, se realizaron ensayos con probetas que tenían alúmina de 30 ppi en lugar de zircona. Los resultados se muestran en la figura 4.1.10., donde se observa una diferencia de desgaste del 10% a favor del acero.

Añadir que algunas veces el desgaste del material no era uniforme, el material se arrancaba y pequeños fragmentos de acero con cerámico se eliminaban. Este hecho implica dos cosas, la primera es que esas grandes partículas de material si se quedaban en el plato desgastaban mucho más rápidamente el acero y, la segunda es que el material en lugar de desgastarse, se arrancaba y al final los valores obtenidos no eran reales y falseaban los resultados con un gran desgaste. En la figura 4.1.11. puede observarse una probeta del material ensayado a desgaste, nótese el gran orificio debido al fragmento eliminado.



Figura 4.1.11. Probeta de composite acero/cerámico después del ensayo de desgaste.



## 4.2 Análisis de imagen

Con el fin de evaluar la influencia de la proporción de cerámico en cada probeta, se procedió a observar las probetas, una vez fueron desgastadas, con el analizador de imágenes. Se realizaron fotografías de la superficie de la probeta cargada después de un tiempo determinado de desgaste. Mediante dos softwares de análisis de imágenes fue posible determinar la proporción de cerámico.



Figura 4.2.1 Superficie de zircona de 10 ppi

La figura 4.2.1. representa una de las fotografías tomadas en la superficie de una probeta cargada con zircona de 10 ppi.

Las fotografías fueron tratadas con Adobe Photoshop y posteriormente con el analizador de imágenes Omnimet Enterprise versión MA861000 5.40 de la casa BUEHLER. De esta manera se determinó la proporción exacta de cerámico, mostrado en blanco en la figura 4.2.1., respecto a la de acero.

Con el software Adobe Photoshop se recuadraron las fotos y el software Omnimet, utilizando diferente tipos de filtros, permitió separar los dos tipos de materiales del composite y determinar la proporción de cada fase.

La figura 4.2.2. representa el análisis de imagen utilizado con una sucesión de filtros, mostrándose con diferentes colores cada una de las fases.





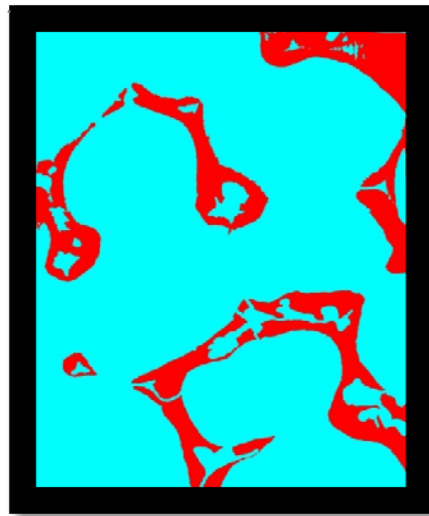


Figura 4.2.2. Zircona de 10 ppi con filtros de imagen.

Finalmente, los resultados obtenidos para la probeta considerada en el primer ensayo de proporción de zircona de 10 ppi oscilaban entre un 14 y un 17% de la superficie total. La tabla 4.2.3. muestra una media de las proporciones de fases con los diferentes tiempos de desgaste.

Tiempo de desgaste (min)	5	8
Proporción de zircona (%)	<b>14,86</b>	<b>15,12</b>

Tabla 4.2.3. Proporción media de zircona de 10 ppi a dos tiempos de desgaste

La proporción de zircona obtenida a dos tiempos de desgaste diferentes no es concluyente para interpretar la influencia de ésta en el desgaste.

Se realizó el mismo procedimiento con las probetas de zircona y alúmina de 30 ppi.



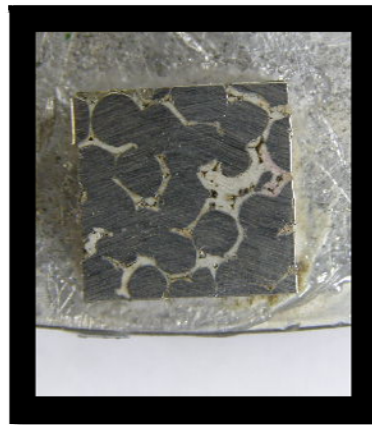


Figura 4.2.4. Zircona de 30 ppi.

La figura 4.2.4. muestra una probeta de zircona de 30 ppi, donde la fase cerámica es superior que la que aparece en la figura 4.2.1., poniéndose en evidencia el mayor tamaño que presenta. Así pues las proporciones de fase cerámica encontradas son mayores tal y como se observa en la tabla 4.2.5..

<b>Tiempo de desgaste (min)</b>	<b>5</b>	<b>8</b>
<b>Proporción de zircona 30 ppi (%)</b>	<b>34,56</b>	<b>35,4</b>
<b>Proporción de alumina 30 ppi (%)</b>	<b>32,74</b>	<b>33,86</b>

Tabla 4.2.5. Proporciones de zircona y alumina de 30 ppi a dos tiempos de desgaste.

Al igual que en el caso anterior los resultados obtenidos no son concluyentes. Por lo tanto, la hipótesis de que la proporción de cerámico pudiera influenciar los resultados obtenidos en desgaste se descarta.



### 4.3 Desgaste con discos de carburo de silicio

#### 4.3.1 Resultados

La figura 4.3.1. muestra cómo evoluciona el desgaste, tanto para el acero como para la zircona de 30 ppi, durante 20 minutos tomándose datos cada 5 minutos. Como puede observarse el desgaste de la zircona se hace más evidente en los primeros 5 minutos del ensayo y, posteriormente, el desgaste disminuye rápidamente hasta llegar casi a cero.

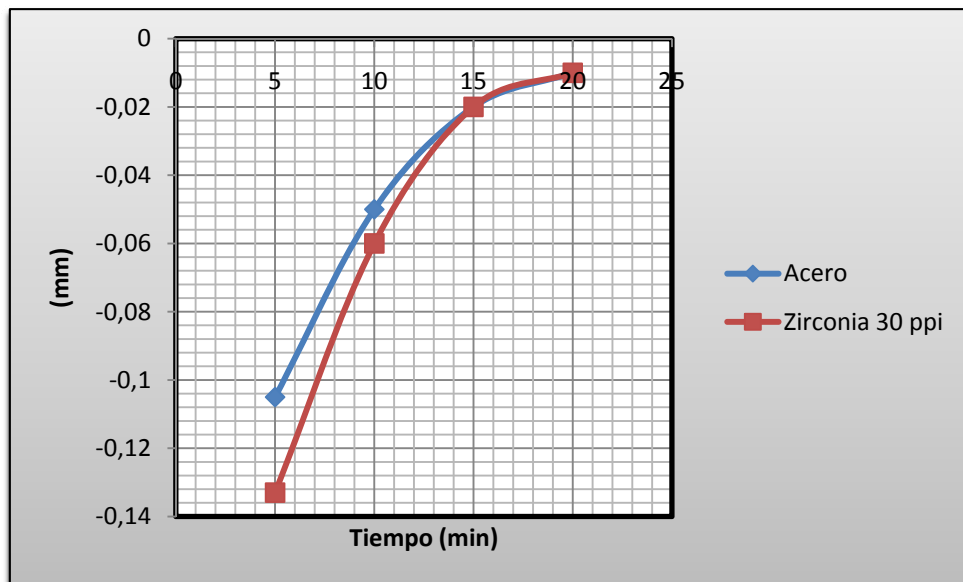


Figura 4.3.1. Evolución del desgaste con el tiempo.

Para verificar estos datos experimentales, se realizó el mismo ensayo para la probeta de alúmina de 30 ppi.



La figura 4.3.2. representa la evolución del desgaste, comparándose el acero con alúmina de 30 ppi durante 25 minutos. La alúmina se desgasta algo más durante los primeros 5 minutos del ensayo que el acero, para acabar confluyendo a cero al finalizar el ensayo.

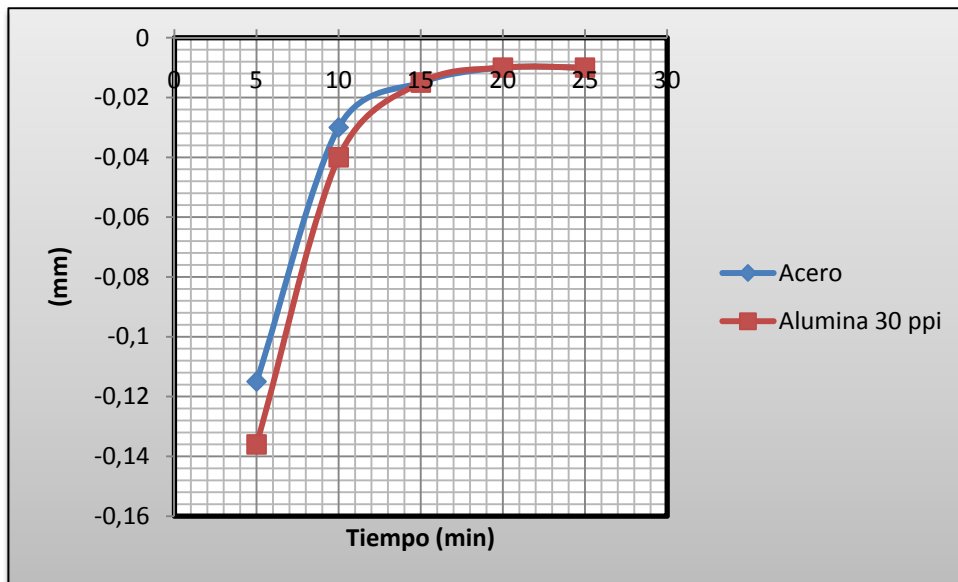


Figura 4.3.2. Evolución del desgaste en el tiempo.

#### 4.3.2 Discusiones

Tanto en la figura 4.3.1. como en la figura 4.3.2. se observa claramente que durante los cinco primeros minutos el carburo de silicio desgasta el acero y el material compuesto. Aunque con el tiempo, el disco también se desgastará hasta llegar a un punto donde no hayan suficientes partículas abrasivas en el disco para desgastar cualquier superficie.

Para verificar este hecho, se han realizado medidas sobre el disco en diferentes puntos representativos de la parte desgastada y de la no desgastada. Se realizaron diversas mediciones utilizando diferentes sistemas, como análisis de imagen o microscopio óptico, pero el mejor método encontrado fue utilizando un palmer.



La tabla 4.3.3. representa las medidas realizadas sobre una veintena de valores en cada parte desgastada y no desgastada, después de ensayar a 3 y 20 minutos.

	Grosor 3 minutos	Grosor 20 minutos
Parte desgastada	31,2	23,4
Parte no desgastada	35,6	30,1

Tabla 4.3.3 Espesor de los discos de carburo de silicio.

Se puede observar que en 3 minutos, el disco se desgastaba unos 4.4  $\mu\text{m}$  y en 20 minutos, 6.7  $\mu\text{m}$ . Se hace notar que la parte no desgastada tiene un grosor inferior después de 20 minutos que después de 3 minutos. Las partículas desgastadas de las probetas se quedan en el disco y continúan desgastando el mismo disco, incluyendo la zona que no toca las probetas. Otra vez se tiene el mismo problema, se retienen partículas en los discos que interfieren en los resultados.

Se realizaron ensayos durante menos tiempo como 3 minutos, incluso 2 minutos y un minuto, obteniéndose siempre los mismos resultados inexplotables.

No obstante, se observa que en los primeros instantes del ensayo el disco desgastaba algo poco cuantificable, aunque todavía se desgastaba menos el acero que el composite, ya sea de zircona o de alúmina.



## 4.4 Soluciones para el desgaste

Antes de empezar el proyecto, ya se conocía que el material compuesto acero/cerámico presentaba una resistencia al desgaste superior al del acero puro con un desgaste del 20%, según datos determinados en campo por la empresa; pero los resultados experimentales obtenidos han mostrado lo contrario.

No obstante, se considera que si se cambian algunos parámetros en el proceso, sería posible obtener mejores resultados.

Por ejemplo, diseñar un sistema que extraiga las partículas desgastadas de manera más eficaz. Esto se podría realizar aumentando el flujo de agua o colocando el sistema de desgaste en posición vertical, para promover la eliminación de las partículas por gravedad. Así pues, con la eliminación de las partículas desgastadas se evitarían errores producidos por la interferencia de éstas.

Otra opción sería conocer con más precisión la fuerza y la velocidad con la que se desgasta el material durante su vida en servicio.

El desgaste aplicado en este proyecto ha sido mucho más severo que el que sufre, en realidad, la pala de la excavadora. Así pues, comparando el desgaste experimental llevado a cabo con el que sufre estando en servicio, se podría evaluar la influencia de la zona no cargada cerca de los dientes de la pala y de esta manera, se tendrían nuevas probetas de unas dimensiones que incluyan la zona que soporta el diente de la pala.

Para finalizar, se puede concluir que el desgaste que sufren los dientes de las palas de las excavadoras durante su vida útil no sea tan abrasivo, es decir, que el desgaste que soporte sea menos severo y que otros factores entren en juego como esfuerzos repetitivos de compresión.



## 4.5 Ensayos de compresión

### 4.5.1 Fundamento teórico

Anteriormente se ha destacado la importancia de realizar todos los ensayos el mismo día porque durante la compresión, no sólo se comprime el material sino que también se comprime la máquina de ensayos. Este fenómeno de compresión, tanto en el material como en el equipo, influye en los resultados. Si se considera que la máquina actúa como un muelle y de manera lineal, se puede describir la deformación efectiva como,

$$\varepsilon_{ef} = \varepsilon_{med} - \varepsilon_C \quad (1)$$

donde  $\varepsilon_{ef}$  representa la deformación efectiva que sigue la ley de Hooke en la parte

elástica:  $\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$  siendo E es el módulo de Young y  $\sigma$  es la tensión.

donde  $\varepsilon_{med}$  es la deformación medida con la expresión:  $\varepsilon_{med} = \ln \left( \frac{l_i}{l_0} \right)$  (2)

siendo  $l_0$  es la longitud inicial y  $l_i$  es la longitud inicial menos el desplazamiento instantáneo.

donde  $\varepsilon_C$  representa la deformación de la máquina y se calcula como:  $\varepsilon_C = \frac{\sigma}{C}$  (3)

siendo  $\sigma$ , la tensión y C representa la fluencia de la máquina.

La parte esencial es que se desconoce el valor numérico del parámetro C y para su determinación se utilizaron las probetas de acero puro. Conocido el módulo de Young del acero que es de 200 GPa y que los ensayos proporcionaban la fuerza aplicada en función del desplazamiento instantáneo, se puede calcular  $\varepsilon_{med}$  y  $\varepsilon_{ef}$  porque la tensión se

escribe como:  $\sigma = \frac{F_i}{A_i}$

siendo  $F_i$ , la fuerza instantánea y  $A_i$ , el área instantánea.



Siguiendo la hipótesis de conservación del volumen durante la deformación plástica,

$$l_0 * A_0 = l_i * A_i$$

Sólo se considera el área instantánea que es:  $9 \times 9 \text{ mm} = 81 \text{ mm}^2$

Mediante la combinación de las ecuaciones (1) (2) y (3) es posible determinar el valor del parámetro C,

$$\sigma = \frac{\varepsilon_{med}}{1/200 + 1/C}$$

El denominador de la expresión anterior,  $(1/200 + 1/C)$  se ha designado como K y corresponde al pendiente de la parte elástica de la curva tensión-deformación medida.

Así se obtiene:

$$C = \frac{200 \cdot 10^3 \cdot K}{200 \cdot 10^3 - K} \quad (4)$$

Con este valor de C se calcula  $\varepsilon_C$  y  $\varepsilon_{med}$  de las probetas de composite acero/cerámico, con el objetivo de obtener las curvas de tensión versus deformación efectiva y determinar el módulo de Young de los materiales objeto de estudio realizando el pendiente de la parte elástica.





## 4.5.2 Resultados

### 4.5.2.1 Probetas de acero

El método seguido para la determinación del parámetro C derivado de los ensayos de compresión sobre el acero puro se describe, a continuación, para una de las probetas.

La figura 4.5.1. representa la curva tensión versus deformación medida de la primera probeta de acero puro. Para la determinación del parámetro K se trazó una recta tangente en la zona elástica.

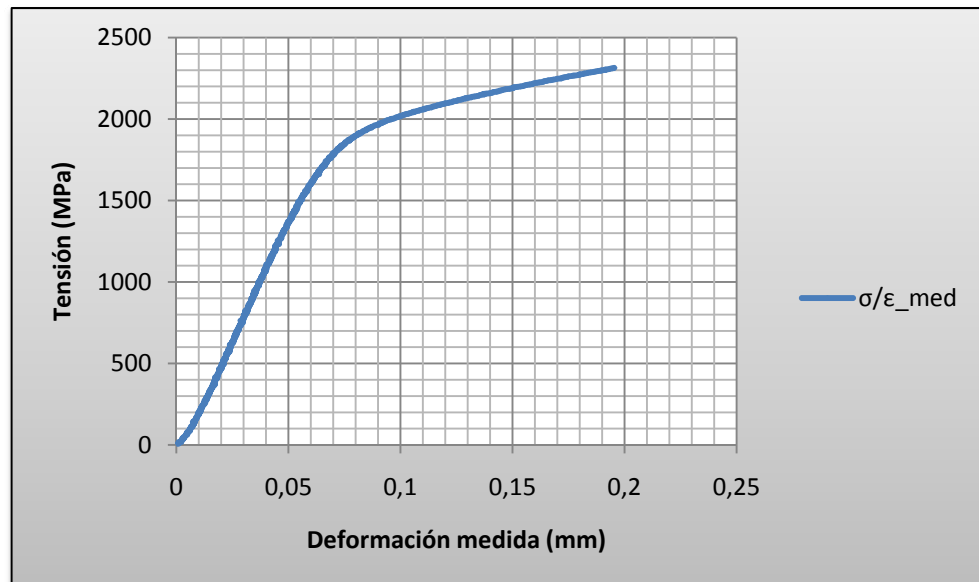


Figura 4.5.1. Diagrama tensión versus deformación medida para el acero 1.



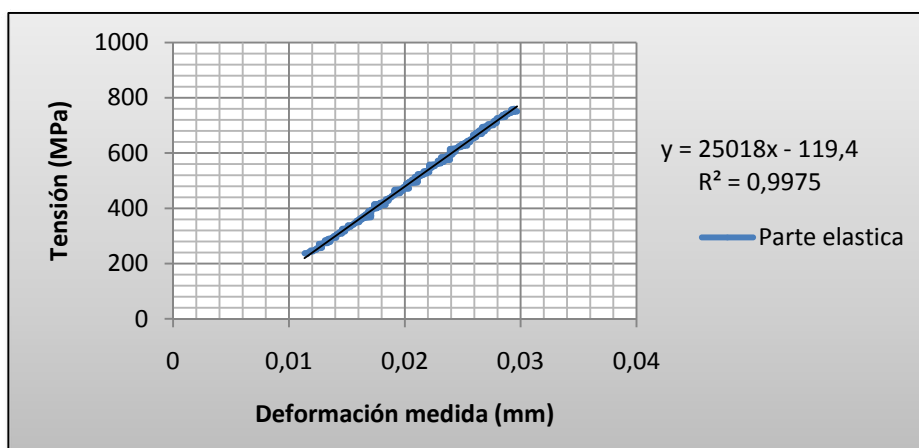


Figura 4.5.2. Parte elástica de la figura 4.5.1.

El valor de  $K$  obtenido fue de 25018 MPa, incluyéndolo en la ecuación (4) se obtiene el valor del parámetro  $C$ , el cual para el caso del acero puro 1 fue de 28594.94 MPa.

Para verificar ese dato se calculó el parámetro  $\mathcal{E}_C$ , pero los valores no coincidían. El motivo de la no coincidencia se debe a que los valores de la zona elástica se encuentran desplazados del origen de coordenadas. El desplazamiento del eje es debido al hecho de que al iniciarse el ensayo la máquina no comprime directamente el material y se presenta un pequeño tiempo de latencia. La solución reside en rectificar los primeros valores, es decir, desplazar la curva hacia el origen de coordenadas. Después de esta modificación, los valores obtenidos son los mismos.

En la figura 4.5.3 se puede observar la translación que fue necesaria aplicar para determinar los valores de  $\mathcal{E}_{ef}$ .



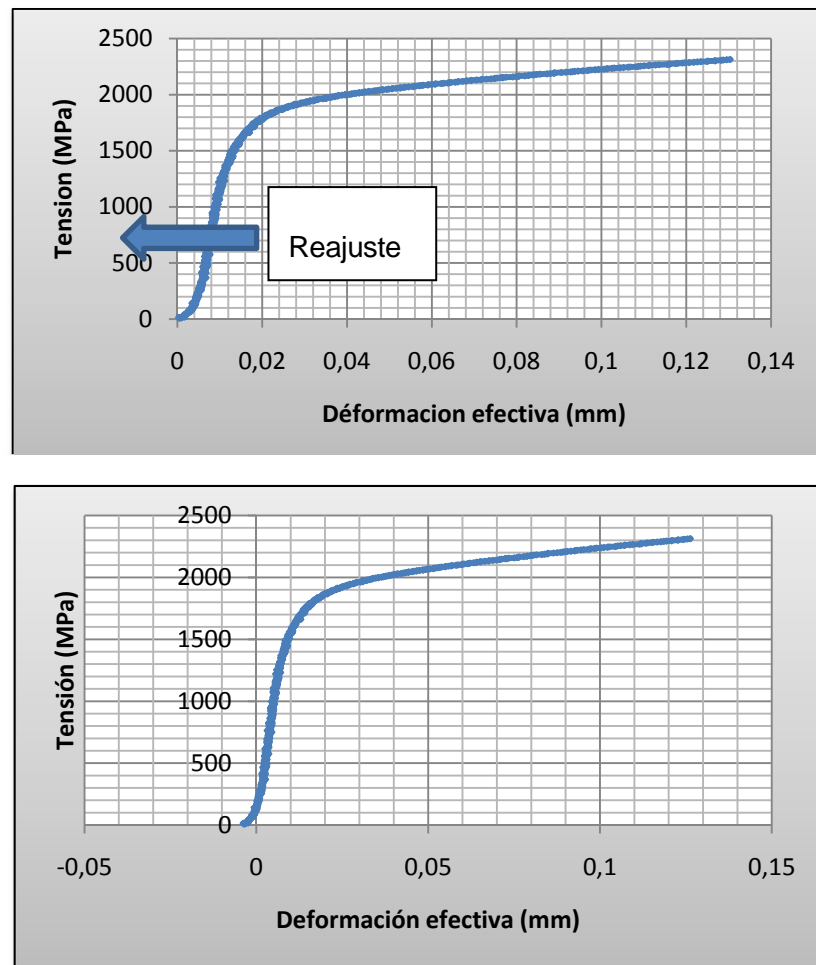


Figura 4.5.3. Curvas tensión versus deformación efectiva con el reajuste efectuado.

En los subsiguientes ensayos con el resto de probetas de acero puro se ha procedido de la misma manera en la determinación del parámetro C.

Para el acero puro 2 se obtuvo que C2 era igual a 27837.46 MPa y para el acero puro 3, el parámetro C fue igual a 29371.95 MPa.

Se realizó una media aritmética sobre los tres valores del parámetro C encontrados,

$$(C1 + C2 + C3)/3 = (28594.94 + 27837.46 + 29371.95)/3 = 28601.13 \text{ MPa}$$

Encontrándose que el parámetro C medio fue de 28601.13 MPa

$$C_{medio} = 28601.13 \text{ MPa}$$



#### 4.5.2.2 Probetas de composite acero/zircona de 30 ppi

Con el valor de  $C_{medio}$  determinado mediante los ensayos de compresión realizados sobre las probetas de acero puro, se procedió a calcular la deformación de la máquina,  $\varepsilon_C$ , mediante la ecuación (3) para, finalmente, obtener la deformación efectiva. Se trazaron los diagramas esfuerzo versus deformación efectiva, calculándose el módulo de Young del composite y analizándose su comportamiento.

Se realizaron ensayos de compresión sobre cuatro probetas de composite de acero/zircona de 30 ppi.

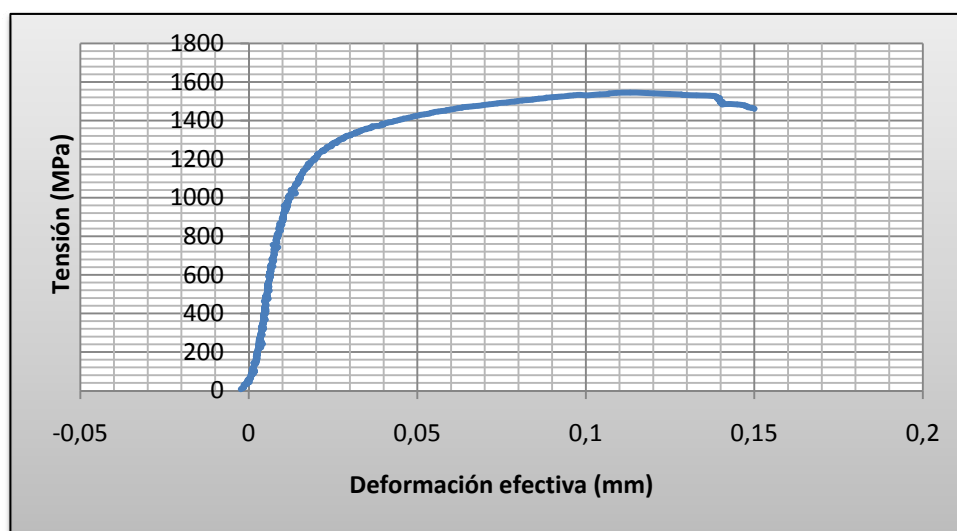


Figura 4.5.4. Diagrama tensión versus deformación efectiva del composite 1.

A partir de la curva representada en la figura 4.5.4, se graficó la zona elástica teniendo en cuenta que el punto de fluencia empieza cerca de 800 MPa.



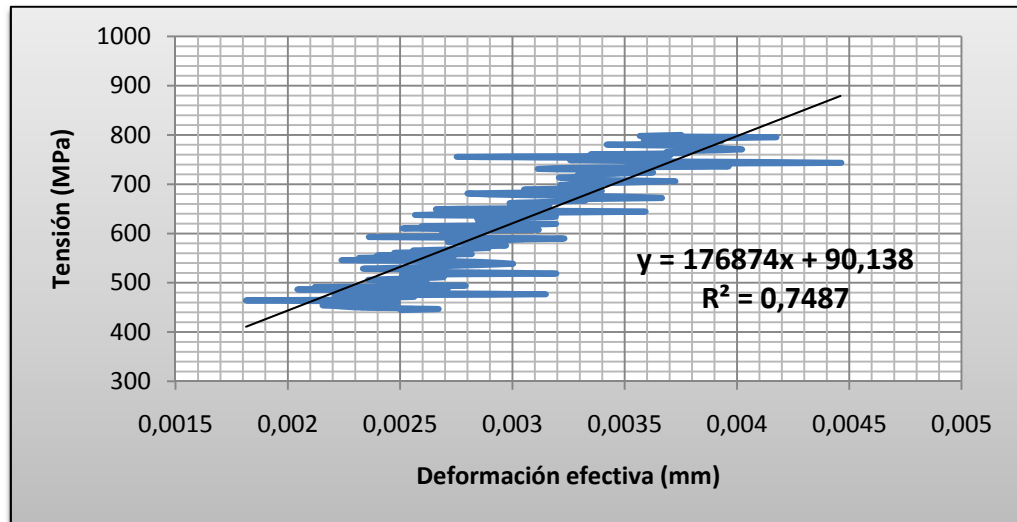


Figura 4.5.6. Parte elástica de la figura 4.5.4.

La figura 4.5.5. representa la zona elástica del diagrama tensión versus deformación efectiva de la primera probeta cargada y la recta tangente de esta representación proporciona el módulo de Young del composite 1:

$$E1 = 176.87 \text{ GPa}$$

Actuando de la misma manera se obtienen los resultados del composite 2.

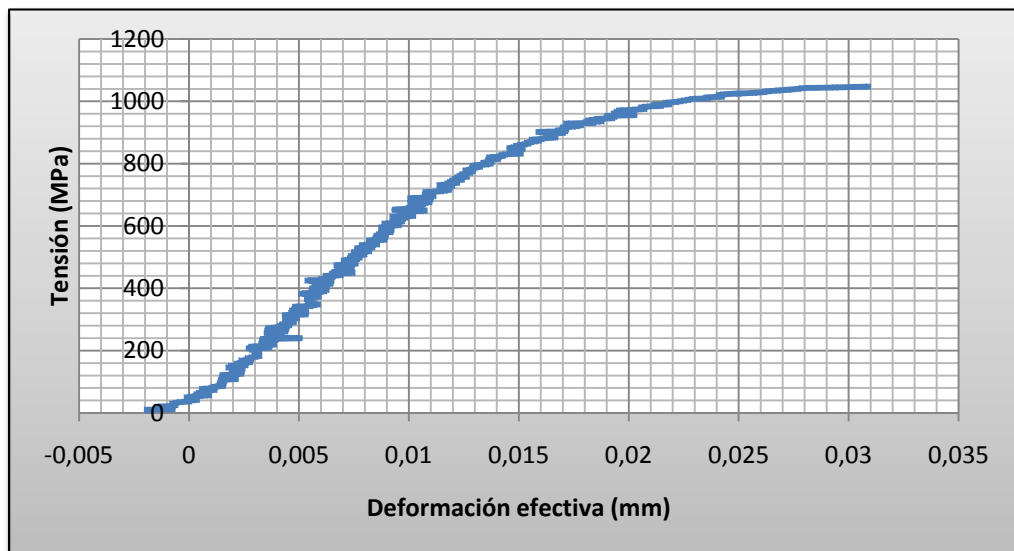


Figura.2.5.7. Diagrama esfuerzo vs deformación efectiva del composite 2.



Se puede observar que la curva de la figura 4.5.7. presenta un punto de fluencia muy bajo.

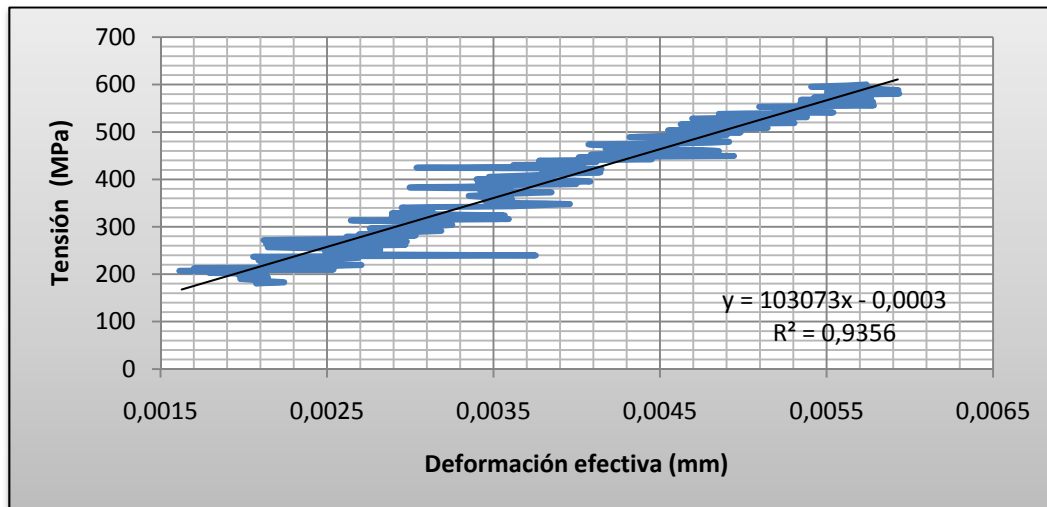


Figura 4.5.8. Parte elástica de la figura 4.5.7.

La figura 4.5.8. muestra la zona elástica de la curva tensión vs deformación efectiva del composite 2 y con la recta tangente a esta representación se obtiene el módulo de Young:

$$E2 = 103.07 \text{ GPa}$$

Actuando de la misma manera se obtienen los valores del composite 3.

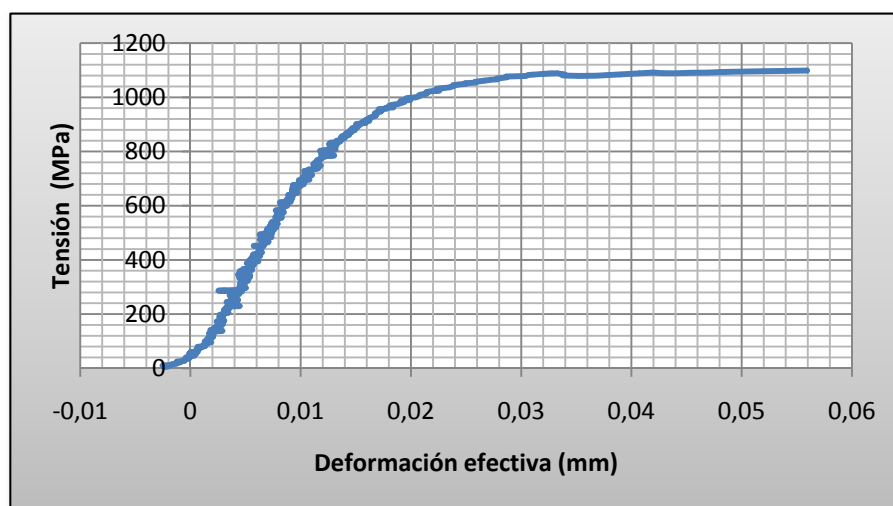


Figura 4.5.9. Curva tensión versus deformación efectiva del composite 3.



La figura 4.5.9. representa el diagrama de tensión versus deformación efectiva del composite 3. Al igual que en el caso anterior, se observa un bajo punto de fluencia.

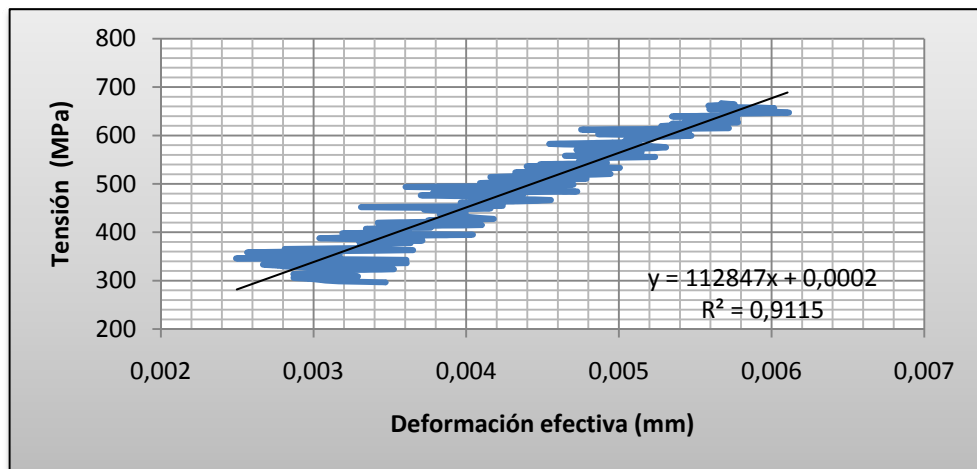


Figura 4.5.10. Zona elástica de la figura 4.5.9.

La figura 4.5.10. permite obtener el módulo de Young del composite 2 mediante la recta tangente de la zona elástica de la figura 4.5.9.

$$E3 = 112.85 \text{ GPa}$$

Procediendo de la misma manera se obtienen los resultados del composite 4.

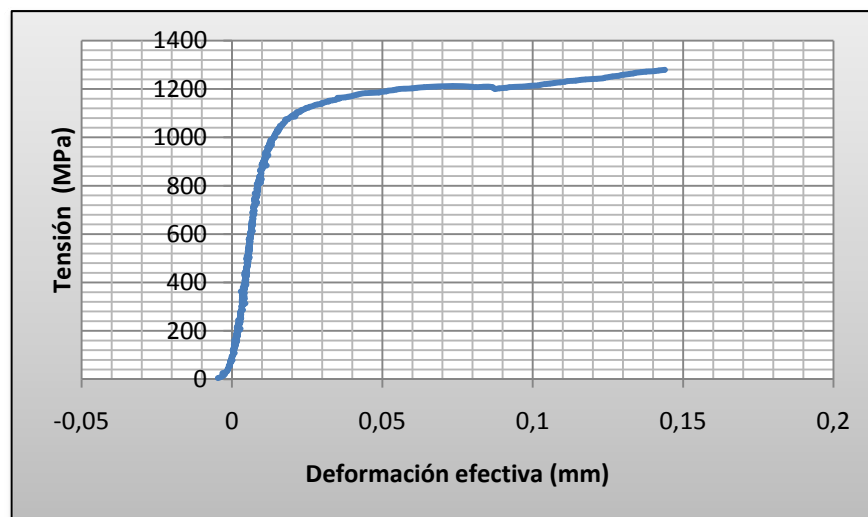


Figura 4.5.11. Curva esfuerzo vs deformación efectiva del composite 4.



En la figura 4.5.11. se muestra el diagrama tensión versus deformación efectiva del composite 4.

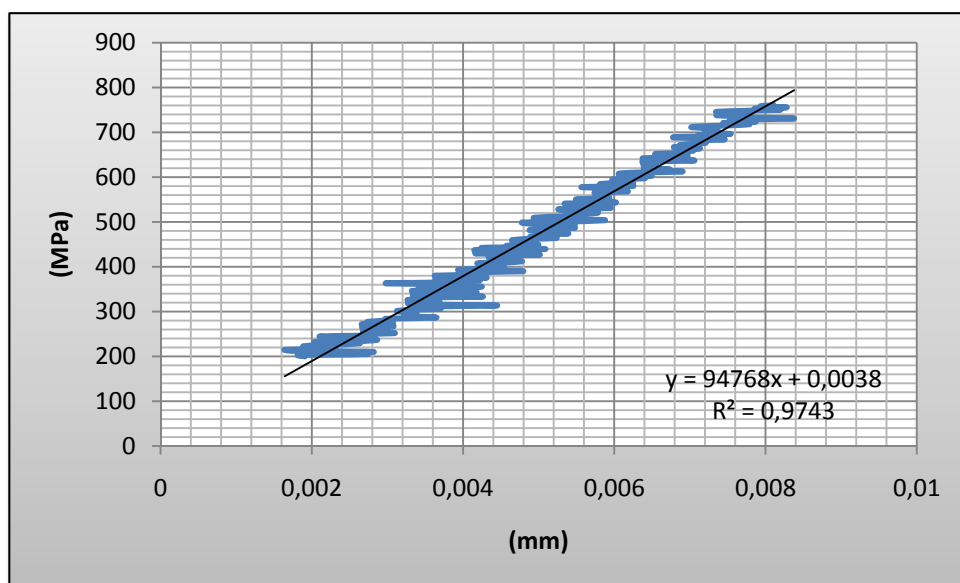


Figura 4.5.12. Zona elástica de la figura 4.5.11.

Esta última figura 4.5.12. representa la zona elástica de la figura 4.5.11., mediante la recta tangente se obtuvo el módulo de Young del composite 4:

$$E4 = 94.77 \text{ GPa}$$





### 4.5.3 Discusiones

La primera parte del estudio, con los aceros puros no es necesaria mucha discusión dado que sólo se realizaron los ensayos de compresión para determinar el valor de la fluencia de la máquina de compresión durante esos ensayos. Ese valor fue de 28.07 GPa.

Con este dato se pudo calcular la deformación efectiva de los composites, sustrayendo la deformación originada por la máquina de ensayos. Con las curvas de compresión se trazaron las gráficas de esfuerzo versus deformación efectiva, obteniéndose el módulo de Young de cada probeta de acero/zircona de 30 ppi estudiada.

Probeta1	176.87 GPa
Probeta 2	103.07 GPa
Probeta 3	112.85 GPa
Probeta 4	94.77 GPa
<b>Media</b>	121.89 GPa

Tabla 4.5.13. Módulos de Young obtenidos en los composites estudiados.

Finalmente, se obtuvo un módulo de Young medio de 121.89 GPa, lo que parece un buen resultado si se tiene en cuenta que el acero posee un módulo de Young de 200 GPa y el cerámico uno de 80 GPa.

La diferencia de valores entre la probeta 4 y la probeta 1 puede explicarse por una diferente distribución entre cerámico y acero en cada probeta. Además del hecho de escucharse algunos pequeños ruidos durante la realización de los ensayos. Estos ruidos podrían significar la presencia de microfracturas en el cerámico dando lugar a resultados erróneos.



## 5 Conclusiones

Las experiencias realizadas durante este proyecto permiten concluir que:

Aunque conociéndose que el material cargado con cerámica, composite, es más resistente en campo, los ensayos realizados ya sean con zircona de 10 ó 30 ppi o con alúmina no proporcionaron los mismos resultados. En efecto, los ensayos han mostrado que el acero parecía más resistente al desgaste abrasivo, tanto con el disco de diamante como con los discos de carburo de silicio. La práctica experimental realizada pone en evidencia que los ensayos realizados en el laboratorio no reproducen con fiabilidad la vida en servicio de los dientes de las palas de las excavadoras. En consecuencia, se concluye que el método experimental descrito ha de modificarse, para obtener resultados más fidedignos.

Se puede añadir que la cerámica del composite es muy porosa. Si se adiciona en exceso, acaba fragilizando a todo el material, de tal manera que cuando se arranca un trozo de cerámico, esta parte se elimina también con el acero y así el material se desgasta mucho más de una sola vez.

Con respecto a los ensayos de compresión, se han obtenido resultados bastante exactos, obteniéndose un módulo de Young medio de 120 GPa para el composite acero/zircona de 30 ppi. Sin embargo, dos probetas ensayadas han dado resultados muy diferentes; lo que parece indicar que sería mejor realizar un número mayor de ensayos para alcanzar mayor reproducibilidad.

En el futuro, se debe mejorar el sistema de estudio de desgaste. Así como evaluar la resistencia del material, el cual durante su vida en servicio sufre compresiones cíclicas de las piedras que caen y vuelven a caer en las palas de las excavadoras.



## 6 Bibliografía

- [1] UPADHYAYA G.S, *Sintered metal-ceramic composites*, 1984.
- [2] I. HUSSAINOVA, *Microstructure and erosive wear in ceramic-based composites*, 2003.
- [3] CUEVAS GUTIERREZ, M. LUJAN, *Desarrollo de un método de ensayos para la predicción del comportamiento al desgaste*, 2005.
- [4] RIO CHAO, M CRISTINA, *Estudio del comportamiento frente al desgaste por abrasión de materiales metálicos usados en molinos de carbón de centrales térmicas*, 2002.
- [5] SURESH BABU YERUVA, *Uniaxial compression and fracture behavior of interpenetrating metal-ceramics composites*, 2003.
- [6] J.M. GOMEZ DE SALAZAR, M.I. BARRENA, G. MORALES, L. MATESANZ, N. MERINO, *Compression strength and wear resistance of ceramic foams*, 1982.
- [7] SAID JAHANMIR, *Friction and wear of ceramics*, 1994.
- [8] ZHENFANG ZHANG, PH.D, *Experimental study and theoretical modeling of friction and wear ceramic particulate-reinforced metal matrix composites*, 1996.
- [9] TONG JIAN-MIN, YE-YING, ZHENG HUA-YI, ZHANG CHING-AN, KONG XIAN-WU, *Investigation of abrasive wear resistance and wear mechanism of composite alloys*, 2003.
- [10] P.J. BLAU, R.G. BAYER, *Wear of materials*, 2003.
- [11] MORITA Y, NAKATA K, KIM YH, NIIHARA K, IKEUCHI K, *Wear properties of alumina/zircona composite ceramics for joint prostheses measured with an end face apparatus*, 2004.



## Agradecimientos

La realización de un proyecto en Barcelona ha supuesto una gran experiencia tanto personal como profesional.

Me gustaría agradecer a mi tutor el Doctor Jorge Alcalá Cabrelles por su ayuda, sus consejos y sus conocimientos. Además quiero dar las gracias muy sinceramente a las personas que con su colaboración han participado para que este proyecto llegase a buen puerto. Àngels Campillo Cerón por su ayuda, su paciencia y su experiencia. Daniel Esque de los Ojos por su ayuda durante los ensayos de compresión. Kim Albo quien me ayudó mucho en la realización de los dispositivos y sistema siempre adecuados para ayudarme al máximo y con quien he compartido buenos momentos y buenas discusiones. Agradezco también a Francisco Heredero Alari del laboratorio de fatiga por su ayuda y cooperación aunque algunas veces no concuerdan entre los laboratorios.

Unas grandes gracias generales a todas las personas que trabajan en el departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería metalúrgica del ETSEIB de la UPC. Agradezco también a Aitor Requena y a la empresa MIMATEC SL por su ayuda en la mecanización de mis probetas, así como a Juan Vicente Rodríguez Redondo, ingeniero de procesos en el centro CIM de Barcelona.

¡Un agradecimiento particular a Ana Hernández Expósito por su generosidad y su gran ayuda para la redacción de este informe hasta horas increíbles!

Finalmente agradezco mucho a mi novia Amandine Delon quien ha hecho también su PFC en este mismo departamento, por su enorme paciencia, su motivación y su presencia en todo momento.



## Presupuesto

El presupuesto de este proyecto se ha realizado teniendo en cuenta lo que le costaría a una empresa privada solicitar un estudio de este composite, donde la investigación fuera llevada a cabo por un ingeniero cualificado.

Los costes del proyecto se pueden dividir en cuatro partes: el personal, el material, las máquinas y el tratamiento de datos.

En el coste de la parte del material se incluye toda la preparación de muestras ya sea para la realización de ensayos de desgaste o de compresión. En el tratamiento de datos se incluyen el soporte informático, la utilización de software de pago, la redacción e impresión del informe, etc.

Por otra parte, en los costes de personal se incluyen las horas dedicadas a la mecanización de las probetas ya sean las del ingeniero o las de una empresa subcontratada, las horas de ensayos, las horas de análisis y de cálculo, así como las horas de documentación. Además, se incluyen las horas de los técnicos cualificados que han realizados los ensayos de compresión.

Finalmente el coste total de este proyecto asciende a 28390€ y la descripción es hecha en la tabla siguiente.



	Tipo	Cantidad	Coste(€)
<b>Personal</b>	Tutor	60 h	2700
	Técnico de laboratorio	100h	1500
	Técnico de máquina de compresión	5h	75
			<b>16400</b>
<b>Material</b>	Discos de diamante para tronzadora pequeña	2	1000
	Disco de diamante D250 T1.5*10	1	460
	Discos carburo silicio	8	180
	Plaquillas de alúmina	2	200
			<b>3440</b>
<b>Oficina</b>	Ordenador	90 días	135
	Papel y bolígrafos		20
	Impresión del informe	1	45
			<b>200</b>
<b>Máquinas</b>	Tronzadora metalográfica	100h	4000
	Cortadora electrónica	45h	2700
	Máquina de compresión	5h	400
	Pulidora automática	20h	900
	Microscopio óptico	5h	350
			<b>8350</b>
<b>Precio total del proyecto : 28390€</b>			



## Impacto sobre el medio ambiente

La utilización de todas las máquinas necesarias para el proyecto consumen energía lo que tiene como consecuencia, sobre una pequeña escala, la liberación de dióxido de carbono a la atmósfera y el aumento del efecto invernadero.

Todos los ensayos de desgaste, así como la utilización de las tronadoras u otras máquinas necesarias para la mecanización de las probetas requieren agua con lubricante. Toda esta agua necesitaría un tratamiento de purificación para eliminar los restos de lubricante y las partículas de acero o de cerámico que se han quitado de los materiales.

También se puede tener en cuenta el transporte del material, así como la subcontratación en el mecanizado de las probetas. En la medida de lo posible, se ha intentado utilizar los transportes públicos, para no tener que usar un coche privado y liberar más dióxido de carbono a la atmósfera.

De una manera más global, el material está destinado a ser utilizado al aire libre pero pienso que no afectará mucho al medio ambiente porque es un material compuesto de un acero no ha sufrido muchos tratamientos y también de cerámicos como la zircona o la alúmina que son cerámicas bioinertes y biocompatibles que se pueden utilizar en implantes o prótesis médicas<sup>[11]</sup>.

